

中图分类号： TQ174
文献标识码： A

文献编号： 1005-1198 (2018) 02-0131-12
DOI： 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2017.12.004



无定型碳的微波损耗特征及其耦合热转换 影响因素分析

鲁艳飞¹, 宋勃震², 张锐^{1,2}, 蔡林杰¹, 张瑜萍¹, 董陈江¹

¹ 郑州航空工业管理学院, 郑州 450046

² 郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 450001

摘要：运用多物理场耦合软件 COMSOL 的微波加热模块对微波加热无定型碳的动态过程进行了模拟分析。结果表明微波加热是整体性加热, 由外而内碳的升温速率逐渐降低, 随着热传递的进行, 内外温度趋于一致。忽略磁损耗效应, 电损耗功率密度与升温速率正相关。电导损耗功率密度与电场模下降趋势相同, 2 s之后介电损耗占主导。介电常数实部单独增大时, 电损耗减小, 升温速率降低; 介电常数虚部单独增大时, 介电损耗先增大后减小, 升温速率先升高后降低; 电导率单独增大时, 电导损耗增大, 升温速率提高。微波输入功率减小时, 电损耗减小, 升温速率降低。碳与空气存在热交换时, 升温速率和温度梯度都有小幅降低, 升温趋势基本不变。点掺杂 Al₂O₃ 时, 掺杂点周围温度变化平缓, 中心点升温速率提高, 温度梯度大幅减小, 升温趋势基本不变。微波加热时间为 7 s 时, 介电损耗最大, 升温速率最高, 7 s 之后升温速率开始降低。

关键词：微波损耗; 耦合热; 无定形碳; 模拟

Analysis of the Microwave Loss Characteristics and Influencing Factors for Coupling Heat Transfer of Amorphous Carbon

LU Yan-Fei¹, SONG Bo-Zhen², ZHANG Rui^{1,2}, CAI Lin-Jie¹,
Zhang Yu-Ping¹, DONG Chen-Jiang¹

¹ Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China

² College of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The microwave heating module of multiphysics coupling software COMSOL is used to simulate the dynamic process of microwave heating for amorphous carbon. The results show that microwave heating is integral heating, and the heating rate of carbon decreases gradually from

收稿日期： 2017-12-21 收到修改稿日期： 2018-03-28

第一作者： 鲁艳飞 (1990-), 男, 河南郸城人, 硕士研究生。E-mail: 2206179155@qq.com。

通讯作者： 张锐 (1967-), 男, 河南淮阳人, 教授。E-mail: zhangray@zzu.edu.cn。

outside to inside. The internal and external temperatures tend to be consistent with the processing of heat transfer. Neglecting the magnetic loss effect, the electrical loss power density is positively correlated with the heating rate. The downtrend of conductivity loss power density is the same as that of the electric field mode, and the dielectric loss is dominant after 2s. When the real part of the dielectric constant increases, the electrical loss and the heating rate decrease. When the imaginary part of the dielectric constant increases, the dielectric loss and the heating rate increase first and then decrease. When conductivity increases, the conductivity loss and the heating rate increase. When the input power of microwave decreases, the electrical loss and the heating rate decrease. When heat exchange occurs between carbon and air, the heating rate and temperature gradient decrease slightly, and the temperature rising trend is basically unchanged. When doped with Al₂O₃, the change of temperature was gentle, the temperature of central point increased, the temperature gradient decreased significantly, and the trend of temperature increase was basically unchanged. When the microwave heating time is 7s, the dielectric loss and the heating rate are the highest. After 7s, the heating rate begins to decrease.

Key words: Microwave loss; Coupling heat; Amorphous carbon; Simulation

SiC 晶体是一种最重要的半导体材料, 具有较高的电阻率、较好的热稳定性、良好的机械强度和硬度、可调电导率和低密度等优点^[1-5]。工业 SiC 一般是通过 Acheson 法合成^[6], 合成温度高达 2200°C ~ 2400°C, 既浪费能量, 又污染环境^[7]。因此急需寻求一种简易、经济、环保的方法合成 SiC。

作为一种新型的加热方式, 微波加热在高温材料制造领域得到了广泛的关注^[8-10]。微波加热过程中的体能量吸收方式使得材料整体均匀升温, 克服了传统加热方式产生的温度梯度。微波在材料内部的损耗是微波加热的基础, 微波损耗特征决定了材料的热生成过程, 进而影响化学反应进程。因此, 通过此控制实验条件降低 SiC 合成温度^[11], 即可采用微波加热方法合成出 SiC 粉体^[12]、SiC 晶须^[13]和 SiC 纳米棒^[14]等。由于微波加热的复杂性^[15-17], 微波损耗的理论计算和微波加热过程中的温度测量通常不易进行。因此, 本文将运用多物理场仿真软件 COMSOL 对微波加热无定形碳的动态过程进行模拟分析, 通过分析微波损耗特征及其所导致的温度变化规律对 SiC 合成过程中的热效应问题做出解释, 以期完善微波加热理论、优化生产工艺。

1 微波-热耦合控制方程

微波在真空中的传播基于 Maxwell 方程组:

$$\left. \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 。

对于存在极化损耗和磁化损耗的介质, 电容率和磁导率为复数, 即

$$\epsilon_C = \epsilon' - j\epsilon'', \quad \mu_C = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

在时谐场中, 有 $\vec{D} = \epsilon_C \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_C \vec{H}$, 代入方程组 (1) 仍然成立。

根据时谐场中存在线性介质的 Poynting 定理可得各种损耗功率密度和电磁能量密度的瞬时值^[18]:

$$\text{瞬时电极化损耗功率密度: } P_p = \omega \epsilon'' \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (3)$$

$$\text{瞬时磁化损耗功率密度: } P_M = \omega \mu'' \vec{H} \cdot \vec{H} \quad (4)$$

$$\text{瞬时电功率密度: } P_E = \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (5)$$

$$\text{瞬时电场能量密度: } \omega_e = \frac{1}{2} \epsilon' \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (6)$$

$$\text{瞬时磁场能量密度: } \omega_m = \frac{1}{2} \mu' \vec{H} \cdot \vec{H} \quad (7)$$

其中式(5)中的 P_E 包括:

$$\text{焦耳损耗功率密度: } P_j = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \cdot \vec{J}$$

$$\text{克服非电性场功率密度: } P_a = -\vec{K} \cdot \vec{J}$$

即: $P_E = P_j + P_a$ (其中, σ 为电导率, K 为非电性场强度)。

进一步可以得到各种损耗功率密度和电磁能量密度的平均值^[18]:

$$\text{平均电极化损耗功率密度: } P_{pav} = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \sum_{i=1}^3 E_{im}^2 \quad (8)$$

$$\text{平均磁化损耗功率密度: } P_{Mav} = \frac{1}{2} \omega \mu'' \sum_{i=1}^3 H_{im}^2 \quad (9)$$

$$\text{平均焦耳损耗功率密度: } P_{jav} = \frac{1}{2\sigma} \sum_{i=1}^3 J_{im}^2 \quad (10)$$

$$\text{平均磁场能量密度: } \omega_{mav} = \frac{1}{4} \mu' \sum_{i=1}^3 H_{im}^2 \quad (11)$$

忽略微波的磁效应, 碳的微波损耗包括电极化损耗(介电损耗)和焦耳损耗(电导损耗)。

电流密度与电场的关系为

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (12)$$

联立式(8)、(10)和(12)可得平均电损耗功率密度:

$$P = P_{pav} + P_{jav} = \frac{1}{2} (\omega \epsilon'' + \sigma) E^2 \quad (13)$$

由Maxwell方程组可以推导出损耗角正切与介电常数虚部和电导率的关系为

$$\tan \delta = \frac{\omega \epsilon'' + \sigma}{\omega \epsilon'} \quad (14)$$

联立式(13)和(14)可得平均电损耗功率密度:

$$P = \frac{1}{2} \omega \epsilon' \tan \delta E^2 \quad (15)$$

微波在谐振腔中传播遵从电磁波频域方程:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 (\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0}) \vec{E} = 0 \quad (16)$$

边界条件为:

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0$$

电磁波在材料内部有一定的穿透深度, 用集肤深度表示:

$$D = \frac{3\lambda_0}{8.686\pi(\epsilon'_r / \epsilon_0)^{1/2} \tan \delta} \quad (17)$$

固体传热方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q + Q_{ted} \quad (18)$$

其中

$$\vec{q} = -k \nabla T$$

边界条件为

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = 0$$

对于微波加热只存在电磁损耗, 式 (18) 变为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (19)$$

其中, $Q_e = Q_{rh} + Q_{ml}$

$$\text{电损耗: } Q_{rh} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\vec{J} \cdot \vec{E}^*) \quad (20a)$$

$$\text{磁损耗: } Q_{ml} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(i\omega \vec{B} \cdot \vec{H}^*) \quad (20b)$$

边界电磁热源为

$$-\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = Q_b$$

2 微波加热碳的动态过程模拟

2.1 建模及参数设置

运用 COMSOL 建立的微波加热模型如图 1 所示: 长方体加热腔尺寸为 $0.1092 \text{ m} \times 0.0546 \text{ m} \times 0.222 \text{ m}$, BJ-26 波导口尺寸为 $0.1092 \text{ m} \times 0.0546 \text{ m}$, 位于长方体加热腔的 XY 面上, 波导口激励频率为 2.45 GHz, 输入功率为 10000 W, 工作模式为 TE103, 圆柱形碳半径和高度均为

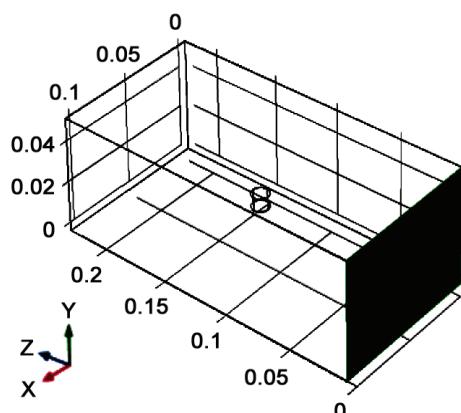


图 1 微波加热模型
Figure 1 Microwave heating model

0.006 m, 中心点坐标为 (0.0546 m, 0.0273 m, 0.111 m)。

微波加热腔壁为完美导电体, 全反射微波, 腔内为真空, 不参与传热。模拟分析采用的真空电磁参数为: 相对介电常数 1, 相对磁导率 1, 电导率 0。

表 1 给出了对东胜褐煤进行元素分析所得到的结果。可以看出, 东胜褐煤成分以碳为主, 因此本文采用东胜褐煤的性能作为模拟分析中无定形碳的参考值。

表 2 东胜褐煤元素分析结果

Table 2 Element analysis results of Dongsheng lignite

Sample	C	H	O	N	S
DS	69.59	5.22	22.08	1.51	0.72

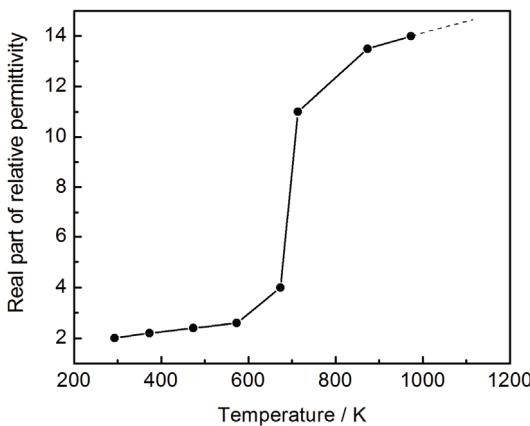


图 2 相对介电常数实部随温度的变化
Figure 2 Variation of the real part of relative permittivity with temperature

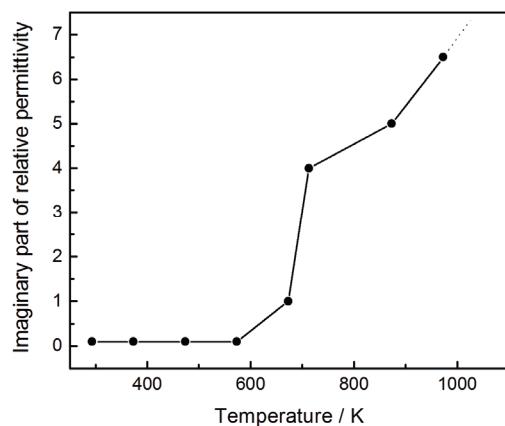


图 3 相对介电常数虚部随温度的变化
Figure 3 Variation of the imaginary part of relative permittivity with temperature

碳的相对介电常数实部和虚部在 20°C ~ 700°C 范围内为阶段线性变化, 外延部分也设为线性变化, 碳的相对介电常数实部和虚部与温度的变化关系分别如图 2 和图 3 所示。

电导率与温度的变化关系可以近似用公式 (21) 表示:

$$\sigma = \sigma_0 / [1 - \alpha(t - t_0)] \quad (21)$$

式中, σ_0 为温度 t_0 时的电导率 (S/m), α 为电阻温度系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

根据文献 [20], 微波频率为 2.45 GHz 时碳的室温电导率为 0.02 S/m, 电阻温度系数设为 $-0.0005^{\circ}\text{C}^{-1}$, 可以将碳的电导率随温度的变化关系写成:

$$\sigma = 0.02 / [1 - 0.0005 \times (T - 273.15)] \quad (22)$$

碳的恒压热容为 502 J/(kg·K), 材料库中碳的导热系数和密度都是温度的函数。

2.2 模拟结果分析

2.2.1 温度变化过程及微波损耗特征

微波加热前 6 s 碳的温度变化如图 4 所示。微波加热过程中, 碳外表面一点 (0.0546 m, 0.0273 m, 0.105 m) 过中心点 (0.0546 m, 0.0243 m, 0.111 m) 到另一点 (0.0546 m, 0.0273 m, 0.117 m) 的温度梯度随弧长的变化如图 5 所示。可以看出, 碳是整体同时升温, 从外到内碳的温度逐渐减小, 说

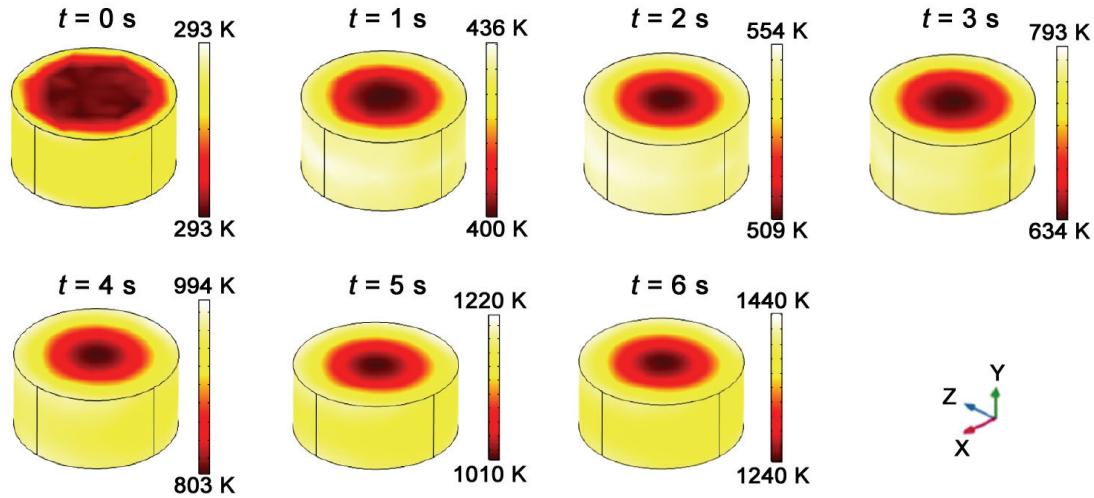


图 4 微波加热碳的温度变化过程
Figure 4 Temperature change process during the microwave heating of carbon

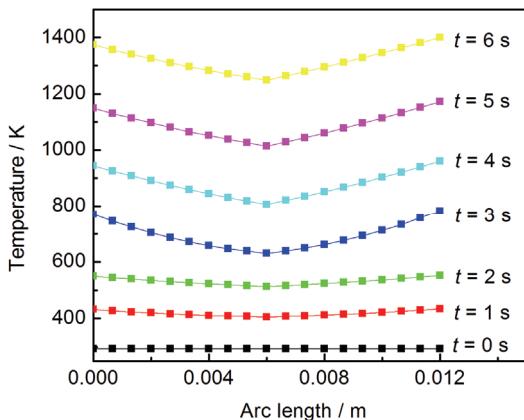


图 5 温度随弧长的变化
Figure 5 Variation of temperature with arc length

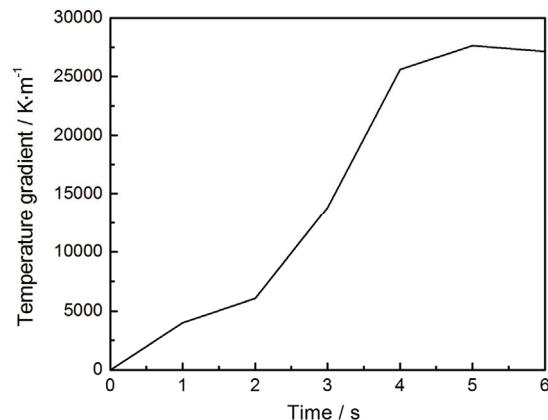


图 6 中心点温度梯度随时间的变化
Figure 6 Variation of center point temperature gradient with time

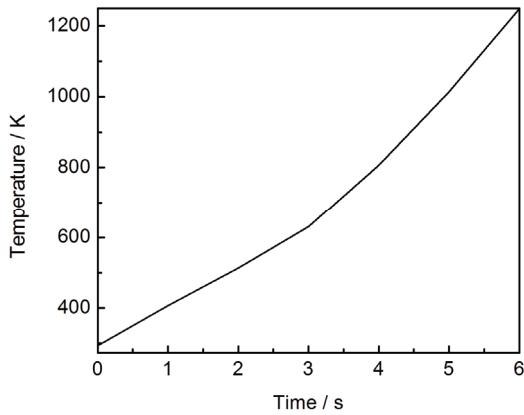


图 7 中心点温度随时间的变化
Figure 7 Variation of center point temperature with time

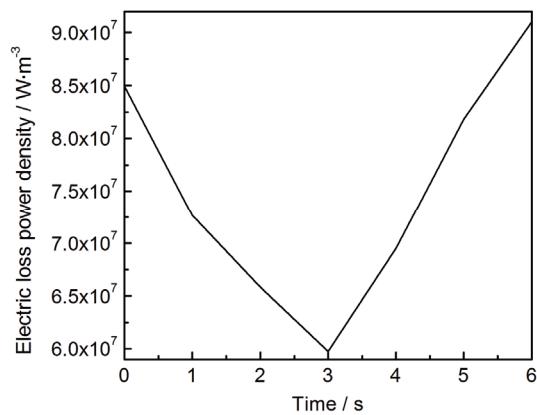


图 8 中心点电损耗功率密度随时间的变化
Figure 8 Variation of center point electric loss power density with time

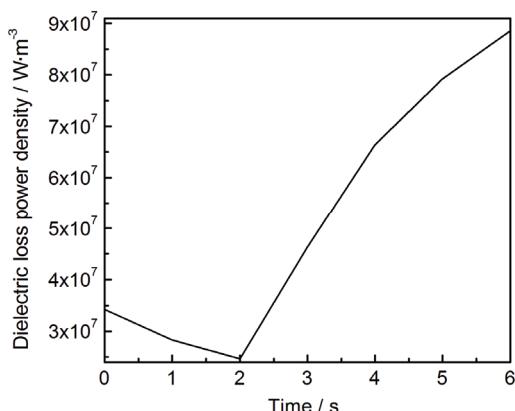


图 9 中心点介电损耗功率密度随时间的变化
Figure 9 Variation of center point dielectric loss power density with time

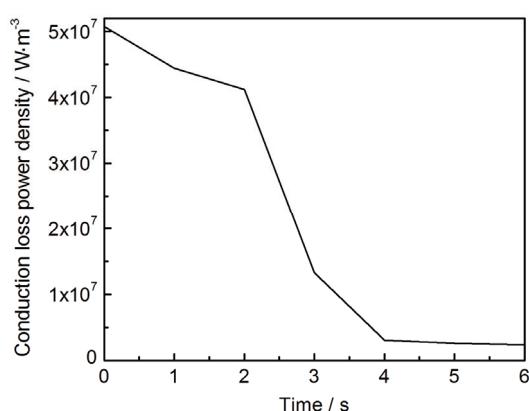


图 10 中心点电导损耗功率密度随时间的变化
Figure 10 Variation of center point conduction loss power density with time

明升温速率从外到内逐渐降低。0 s ~ 5 s 区间内，内外温差逐渐拉大；随着热传递的进行，5 s ~ 6 s 期间，温差开始缩小，对应碳中心点温度梯度在 5 s 时开始减小，如图 6 所示。

中心点温度随时间的变化关系如图 7 所示：0 s ~ 3 s 升温速率逐渐降低，3 s ~ 6 s 升温速率逐渐升高。这主要是由于 0 s ~ 3 s 之间电损耗减小，而 3 s ~ 6 s 之间电损耗增大（如图 8 所示），也就是说升温速率随电损耗的增大而升高。

2.2.2 介电损耗与电导损耗的变化特征

电损耗功率密度主要包括介电损耗功率密度和电导损耗功率密度，其随时间的变化关系分别如图 9 和图 10 所示。

图 11 是中心点电场模随时间的变化关系曲线。根据式 (17)，微波在材料内部有一定的穿透深度，随着复介电常数和电导率的增大，穿透深度减小，相应的中心点电场模也减小。根据公式，微波损耗与电场模平方成正比，电场减小导致微波损耗减小。图 10 中电导损耗与电场模减小趋势大致相同，而图 9 中介电损耗在 0 s ~ 2 s 之间减小，2 s ~ 6 s 之间增大，3 s 时与电损耗同时增大，说明微波加热碳的过程中，0 s ~ 2 s 之间介电损耗和电导损耗共同主导，2 s 之后介电损耗占主导。

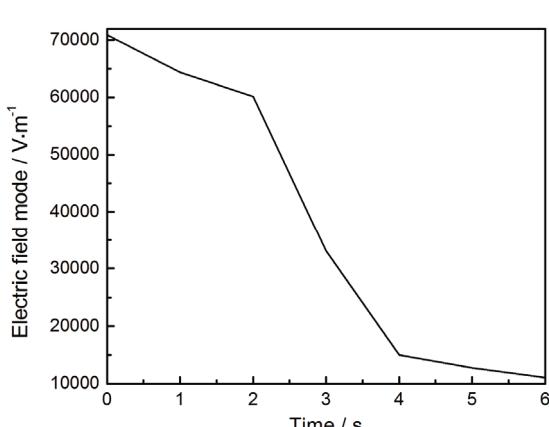


图 11 中心点电场模随时间的变化
Figure 11 Variation of center point electric field mode with time

3 微波热效应的影响因素

3.1 复介电常数的影响

分别讨论相对介电常数实部和虚部对耦合热的影响：(1) 控制相对介电常数虚部为 0.1，电导率为 0.02 S/m，其他不变，相对介电常数实部引起的温度变化如图 12 所示。可以看出，随着相对介电常数实部增大，升温速率减小。这是由于介电常数增大导致电场模减小（如图 13 所示），从而电损耗减小。(2) 保持介电常数实部为 2，电导率为 0.02 S/m，其他不变，介电常数虚部引起的温度变化如图 14 所示。可以看出，随介电常数虚部增大，升温速率升高，升温速率主要受

介电损耗的影响, 如图 15 所示, 2 s~3 s 之间介电损耗增大, 升温速率升高, 3 s~6 s 之间介电损耗减小, 升温速率降低。

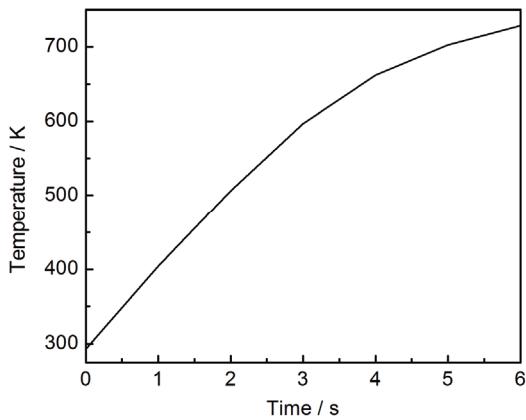


图 12 中心点温度随时间的变化

Figure 12 Variation of center point temperature with time ($\epsilon'' = 0.1$, $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$)

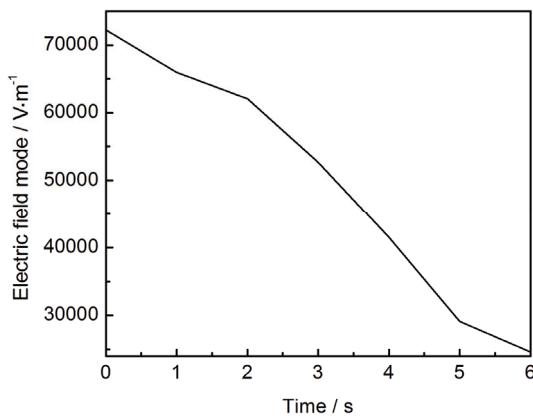


图 13 中心点电场模随时间的变化

Figure 13 Variation of center point electric field mode with time ($\epsilon'' = 0.1$, $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$)

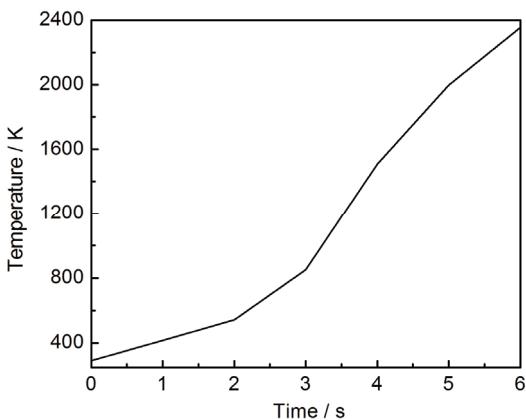


图 14 中心点温度随时间的变化

Figure 14 Variation of center point temperature with time ($\epsilon' = 2$, $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$)

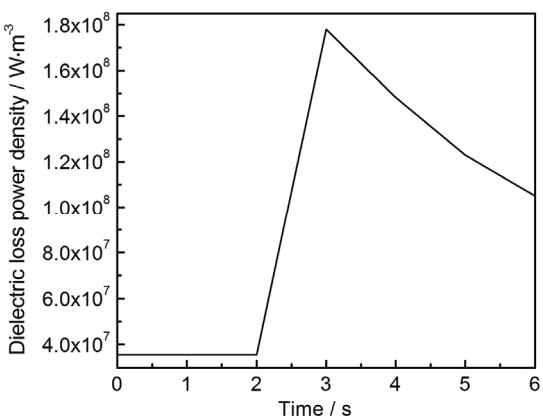


图 15 中心点介电损耗功率密度随时间的变化

Figure 15 Variation of center point dielectric loss power density with time ($\epsilon' = 2$, $\sigma = 0.02 \text{ S/m}$)

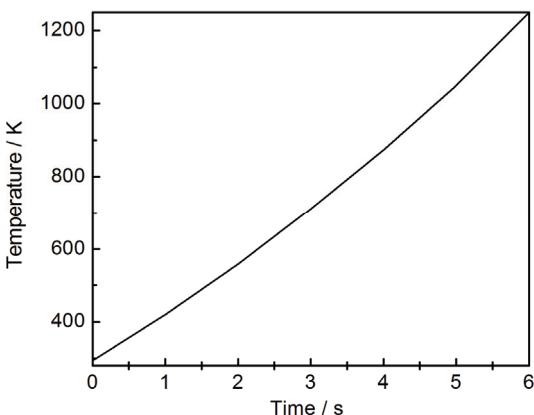


图 16 中心点温度随时间的变化

Figure 16 Variation of center point temperature with time ($\epsilon_c = 2 - 0.1j$)

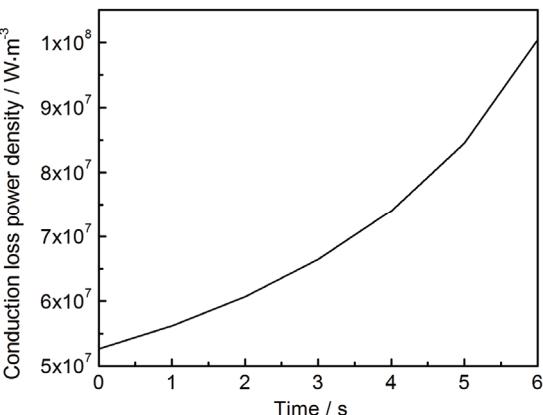


图 17 中心点电导损耗功率密度随时间的变化

Figure 17 Variation of center point conduction loss power density with time ($\epsilon_c = 2 - 0.1j$)

3.2 电导率的影响

保持碳的复介电常数为 $\epsilon_c = 2 - 0.1j$, 其他条件不变, 得到的中心点升温速率如图 16 所示, 电导损耗功率密度随时间的变化关系如图 17 所示。可以看出, 电导率增大使电导损耗增大, 相同时间内吸收更多的热量, 从而升温速率升高。

3.3 微波输入功率的影响

改变微波输入功率分别为 5000 W 和 7500 W, 中心点温度随时间的变化关系分别如图 18 和图 19 所示。比较图 18、图 19 和图 7 可以看出, 随着微波输入功率的增大, 升温速率分别在 5 s、4 s、3 s 时开始增大, 相应的其电损耗也在对应时间点开始增大, 6 s 时达到最大温度, 分别为 660 K、1000 K、1250 K, 说明增大微波输入功率可以提高升温速率, 并且能更快达到最大升温速率。

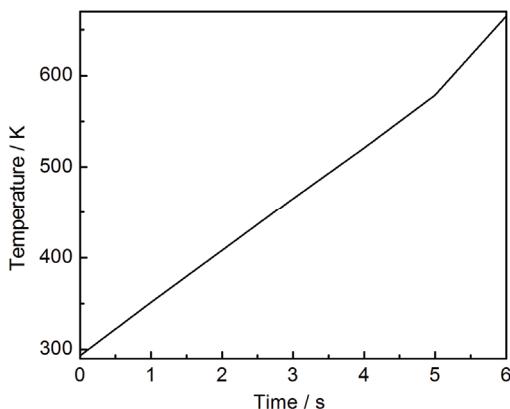


图 18 中心点温度随时间的变化
Figure 18 Variation of center point temperature with time (microwave power 5000 W)

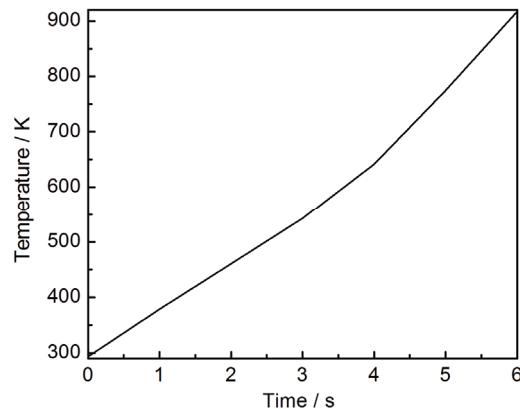


图 19 中心点温度随时间的变化
Figure 19 Variation of center point temperature with time (microwave power 7500 W)

3.4 保温结构的影响

不加保温层的碳与空气之间存在热交换。在这种情况下, 中心点温度随时间的变化关系如图 20 所示。比较图 7 和图 20 可知, 由于热交换的影响, 无保温结构的碳升温速率有所降低, 但温度总体变化趋势不变。

3.5 杂质的影响

材料在制备过程中难免存在杂质。选取 Al_2O_3 为杂质成分, 其相对介电常数实部和损耗角正切值随温度变化关系分别如图 21 和图 22 所示^[21], 内插和外延部分均为阶段线性变化。

在圆柱形碳内部均匀选取 6 个点作为 Al_2O_3 掺杂点, 模型如图 23 所示。分析发现, 微波加热 6 s 后, 系统的最高温度可以达到 1460 K (图 24)。掺杂之后温度梯度大幅降低 (图 25), 中心点最大温度梯度则由掺杂前的 28000 K/m 下降到掺杂后的 4000 K/m, 温度沿弧长的变化平缓 (图 26)。

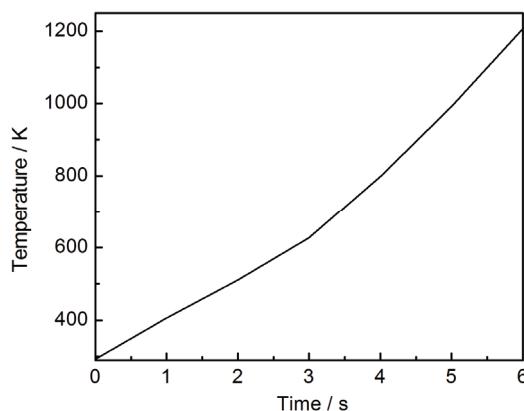


图 20 中心点温度随时间的变化
Figure 20 Variation of center point temperature with time (without insulating layer)

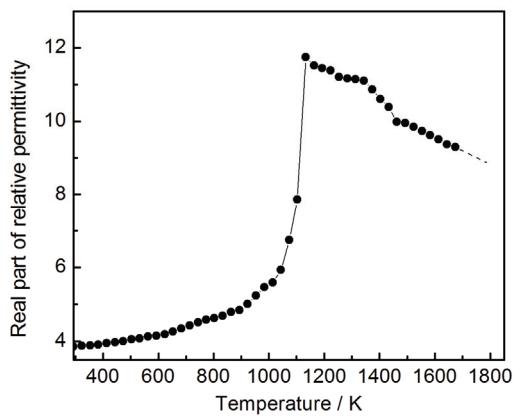


图 21 Al_2O_3 相对介电常数实部随温度的变化
Figure 21 Variation of real part of relative permittivity with temperature for Al_2O_3

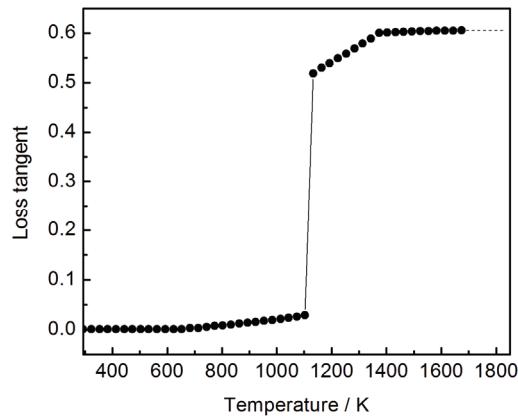


图 22 Al_2O_3 损耗角正切随温度的变化
Figure 21 Variation of loss tangent with temperature for Al_2O_3

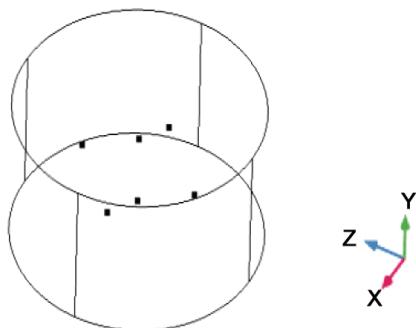


图 23 Al_2O_3 掺杂点
Figure 23 Positions for Al_2O_3 doping (6 points)

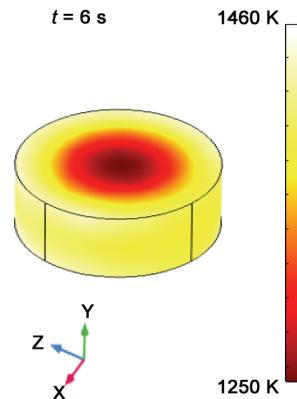


图 24 掺杂 Al_2O_3 的碳在微波加热 6 s 时的温度分布
Figure 24 Temperature distribution in A_2O_3 -doped carbon being microwave heated for 6 s (6 points)

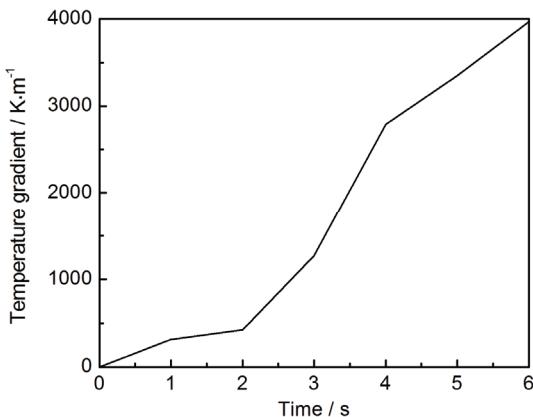


图 25 中心点温度梯度随时间的变化
Figure 25 Variation of center point temperature gradient with time (Al_2O_3 doping, 6 points)

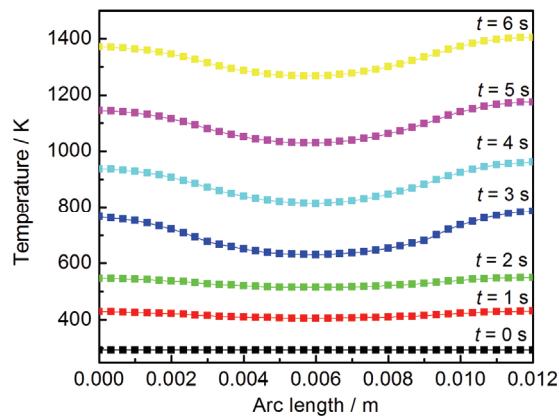


图 26 温度随弧长的变化
Figure 26 Variation of temperature with arc length (Al_2O_3 doping, 6 points)

如果如图 27 所示选取 12 个 Al_2O_3 掺杂点, 则中心点温度梯度较 6 个掺杂点时进一步减小, 最大温度梯度仅为 3600 K/m, 各部分温度变化更加平缓, 如图 28 所示。

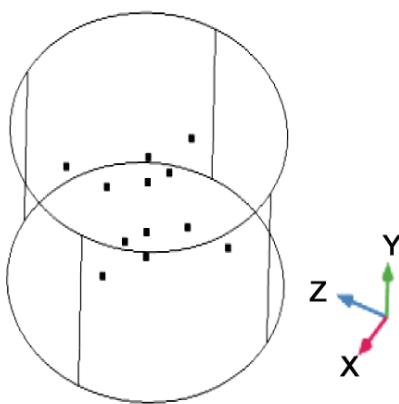
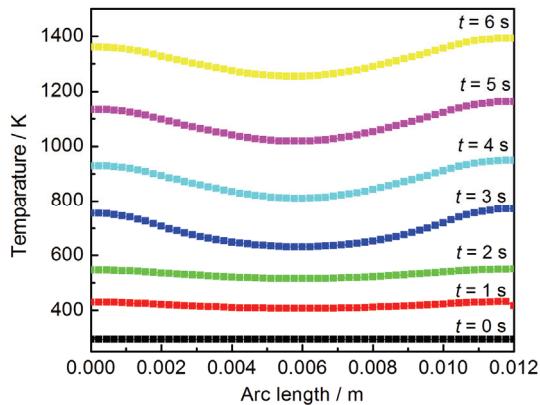
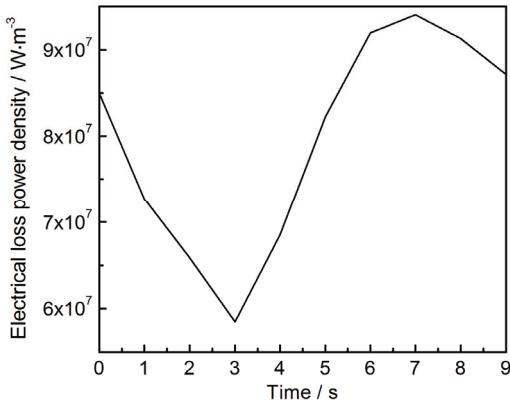
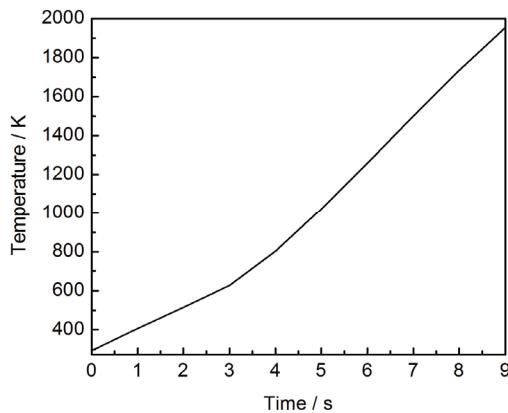
图 27 Al_2O_3 摊杂点Figure 27 Positions for Al_2O_3 doping (12 points)

图 28 温度随弧长的变化

Figure 28 Variation of temperature with arc length (Al_2O_3 doping, 12 points)图 29 中心点电损耗功率密度随时间的变化
Figure 29 Variation of center point electric loss power density with time (up to 9 s)图 30 中心点温度随时间的变化
Figure 30 Variation of center point temperature with time (up to 9 s)

3.6 加热时间的影响

延长微波加热时间至 9 s, 模拟分析结果如图 29 和图 30 所示。可以看出, 中心点电损耗功率密度在 7 s 时开始减小, 升温速率在 7 s 时也开始降低。

4 结 论

根据 Maxwell 方程组计算出各种损耗功率密度和电磁能量, 运用 COMSOL 软件模拟出不同条件下碳的微波损耗特征和温度变化规律, 模拟结果与理论计算值符合较好, 可以得出以下结论:

- (1) 微波加热是整体加热, 温度由内而外依次升高, 温度梯度先增加后减小, 最终温度趋于一致。
- (2) 微波损耗功率密度与升温速率成正相关, 碳的微波损耗主要是介电损耗。
- (3) 随复介电常数和电导率的增大, 碳的电场模减小, 电导损耗与电场模的减小趋势基本一致, 所以电导损耗功率密度与电场模在碳内部的大小分布基本相同。
- (4) 介电常数实部单独增大时, 电场模减小, 介电损耗和电导损耗减小, 升温速率降低; 介电常数虚部单独增大时, 电场模减小, 介电损耗先增大后减小, 升温速率先升高后降低。
- (5) 电导率单独增大时, 电场模减小, 电导损耗增大, 升温速率提高。

- (6) 微波输入功率减小时, 各种损耗功率密度减小, 损耗功率密度开始增大时间点延长。
- (7) 增加保温结构和 Al_2O_3 掺杂点以及适当延长加热时间都能提高碳的升温速率, 减小温度梯度。

参考文献

- [1] FAN J, WU X, CHU P. Low-dimensional SiC nanostructures: fabrication, luminescence, and electrical properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2006, 51: 983–1031.
- [2] SU X, ZHOU W, LUO F, et al. A cost-effective approach to improve dielectric property of SiC powder [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 476: 644–647.
- [3] ZHAO D, LUO F, ZHOU W. Microwave absorbing property and complex permittivity of nano SiC particles doped with nitrogen [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 490: 190–194.
- [4] TAN E, KAGAWA Y, DERICIOGLU AF. Electromagnetic wave absorption potential of SiC-based ceramic woven fabrics in the GHz range [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44: 1172–1179.
- [5] ZHU HL, BAI YJ, LIU R, et al. In situ synthesis of one-dimensional MWCNT/SiC porous nanocomposites with excellent microwave absorption properties [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21: 13581–13587.
- [6] ACHESON G. Production of artificial crystalline carbonaceous material; 美国 US492767 [P]. 1893.
- [7] ALLIEGO RA, COFFIN LB, TINKLEPAUGH JR. Pressure-sintered silicon carbide [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1956, 39: 386–389.
- [8] CHAMMOND S, CARRY CP, BOUVARD D. Densification and microstructure evolution of Y-tetragonal zirconia polycrystal powder during direct and hybrid microwave sintering in a single-mode cavity [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30: 1211–1221.
- [9] ZUO F, CARRY C, SAUNIER S, et al. Comparison of the microwave and conventional sintering of alumina: effect of Mg O doping and particle size [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96: 1732–1737.
- [10] CHEN Y, FAN B, SHAO G, et al. Preparation of large size ZTA ceramics with eccentric circle shape by microwave sintering [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2016, 4: 1–7.
- [11] TOURADJ E, EHSAN MR. Microwave hybrid synthesis of silicon carbide nanopowders [J]. *Materials Characterization*, 2009, 60: 69–72.
- [12] SATAPATHY LN, RAMESHA PD, DINESH A, et al. Microwave synthesis of phase-pure, fine silicon carbide powder [J]. *Materials Research Bulletin*, 2005, 40: 1871–1882.
- [13] DAI CH, ZHANG XP. Microwave synthesis of ultrafine silicon carbide whiskers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, 80: 1274–1276.
- [14] MOSHTAGHIOUN BM, POYATO R, CUMBRERA FL, et al. Rapid carbothermic synthesis of silicon carbide nano powders by using microwave heating [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32: 1787–1794.
- [15] ACILGOZ H, BIHAN YL, MEYER O, et al. Microwave finite element modeling: applications to coupled electromagnetic-thermal problems and characterization of dielectric materials [R]. Presented at 12th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering & Applications. France, Grenoble, 2010.
- [16] BOUVARD D, CHAMMOND S, CARRY CP. Multiphysics simulation of microwave sintering in a monomode cavity[R]. Presented at 12th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering & Applications. France, Grenoble, 2010.
- [17] LOVAS M, KOVACOVA M, DIMITRAKIS G, et al. Modeling of microwave heating of andesite and minerals [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53 (17–18): 3387–3393.
- [18] 罗凌霄. 介质损耗与电磁能量[J]. 大学物理, 2010, 29 (1): 13–15.
- [19] 王晴东, 王光华, 陈彪, 等. 东胜褐煤与 Yallourn 褐煤热解过程中微波吸收特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41 (6): 1540–1545.
- [20] 徐龙君, 刘成伦, 鲜学福. 频率对突出区煤导电性的影响[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27 (6): 25–26.
- [21] 吕晶. 微波烧结 Al_2O_3 陶瓷过程中介电性能温变规律的模拟研究[D]. 青岛: 青岛大学硕士学位论文, 2016.